



The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Սև խոռոչները ենթարկվում են թերմոդինամիկ «օրենքների». նոր արդյունքը դրանք տարածում է հավասարակշռությունից խիստ հեռու սև խոռոչների վրա

1970-ականներից հայտնի է, որ սև խոռոչները ենթարկվում են թերմոդինամիկային նման օրենքների, բայց ամենամաքուր ձևը կիրառելի էր միայն հանգիստ հավասարակշռության մեջ գտնվող սև խոռոչների համար: *Physical Review Letters*-ի նոր հոդվածը առաջին և երկրորդ օրենքները տարածում է արագ փոփոխվող՝ նյութ կլանող, միաձուլվող կամ ճառագայթող սև խոռոչների վրա՝ օգտագործելով տեղային սահմանված «դինամիկ հորիզոններ»: Սա թույլ է տալիս ջերմաստիճան և էնտրոպիա վերագրել նույնիսկ ուժգին զարգացող սև խոռոչին: Սա դասական ընդհանուր հարաբերականության մաթեմատիկական արդյունք է, ոչ նոր քվանտային գրավիտացիա, ոչ դիտարկում և ոչ սև խոռոչի տեղեկատվական պարադոքսի լուծում:

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, *Physical Review Letters* 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

Սև խոռոչներն ունեն թերմոդինամիկայի նման «օրենքներ»: Կոկիկ տարբերակը աշխատում էր միայն երբ ոչինչ չէր կատարվում

Ֆիզիկայի ամենատարօրինակ փաստերից մեկն այն է, որ սև խոռոչներն իրենց պահում են տաք մարմինների պես: 1970-ականների սկզբին Bekenstein-ը և Hawking-ը նկատեցին, որ սև խոռոչները կառավարող հավասարումները անդամ առ անդամ համընկնում են թերմոդինամիկայի օրենքների հետ. սև խոռոչն ունի իր հորիզոնի մակերեսին համեմատական էնտրոպիա և մակերևութային գրավիտացիային համեմատական ջերմաստիճան: Հետո Hawking-ը ցույց տվեց, որ այդ ջերմաստիճանը ամենախոր իմաստով իրական է՝ սև խոռոչն իսկապես շատ թույլ ջերմային ճառագայթում է արձակում:

Ի՞նչ է Hawking ճառագայթումը

Դասական ֆիզիկայում սև խոռոչից ոչինչ չի փախչում, ուստի այն պետք է կատարյալ սև լինի և ընդհանրապես ջերմաստիճան չունենա: 1974-ին Stephen Hawking-ը ցույց տվեց, որ հորիզոնի մոտ քվանտային տեսությունը հաշվի առնելիս պատկերը փոխվում է. սև խոռոչը թույլ ջերմային փայլ է արձակում և այդ պատճառով դանդաղ կորցնում զանգվածը, այսինքն՝ «գոլորշիանում»: Սպեկտրը Hawking ջերմաստիճանում ջերմային է, իսկ կոր տարածաժամանակով տարածվելը փոխում է այն ճառագայթումը, որը հասնում է անվերջություն: Տարածված հևրիստիկ պատկերում, որը Hawking-ի իրական բերումն է, հորիզոնի հենց դրսում քվանտային տատանումները ստեղծում են գույգեր, որոնցից մեկը փախչում է որպես ճառագայթում, մյուսը ընկնում ներս:

Կարևոր առանձնահատկությունն այն է, որ այս ջերմաստիճանը *հակադարձ համեմատական* է սև խոռոչի զանգվածին. որքան փոքր է խոռոչը, այնքան ավելի տաք է: Աստղադիտակով տեսանելի ցանկացած սև խոռոչի համար ջերմաստիճանը ֆանտաստիկորեն ցածր է՝ շատ ավելի ցածր, քան նրան շրջապատող դատարկ տարածության ջերմաստիճանը, այնպես որ գործնականում փայլը աննշան է և երբեք ուղղակիորեն չի չափվել: Դրա կարևորությունը գաղափարական է. Hawking ճառագայթումն է, որ սև խոռոչների մեխանիկայի և թերմոդինամիկայի *անալոգիան* դարձնում է իրական թերմոդինամիկա: Քանի որ խոռոչն իսկապես ջերմաստիճան ունի, այս օրենքների «ջերմաստիճանն» ու «էնտրոպիան» իրական թերմոդինամիկական մեծություններ են, ոչ ձևական համընկնում: (Սա ներկա հոդվածի նախապատմությունն է, ոչ դրա արդյունքներից մեկը:)

Այս համապատասխանությունը ամրագրվում է **սև խոռոչների մեխանիկայի առաջին օրենք** կոչվող արդյունքով (Bardeen, Carter և Hawking, 1973): Բառերով՝ եթե սև խոռոչը մի կայուն վիճակից շատ փոքր չափով տեղափոխեք մոտակա կայուն վիճակ, նրա զանգվածի փոփոխությունը հավասար է ջերմաստիճանը

բազմապատկած Էնտրոպիայի փոփոխությանը՝ գումարած պտույտի անդամը: Դա «ներս մտնող ջերմությունը հավասար է ջերմաստիճան $\times$ Էնտրոպիայի փոփոխություն» գաղափարի սև խոռոչային տարբերակն է:

Բայց *մոտակա կայուն վիճակ* արտահայտության մեջ թաքնված խնդիր կա: 1973-ի մաքուր օրենքը համեմատում է հավասարակշռության մեջ հանգիստ նստած երկու սև խոռոչ, որոնք իրարից տարբերվում են միայն անվերջ փոքր չափով: Այն իրականում երբեք **գործընթաց** չի նկարագրում՝ աստղ կլանող սև խոռոչ, երկու սև խոռոչների միաձուլում, ուժգին ծնունդից հետո ringing down անող նոր խոռոչ: Հենց դրանք են մեզ ամենաշատ հետաքրքրող իրավիճակները և «հանգիստ նստելու» հակառակը: Կոկիկ օրենքը լրում է հենց այն ժամանակ, երբ սև խոռոչը հետաքրքիր է:

Ինչու ակնհայտ ուղղումը չի աշխատում

Կարող է թվալ, թե լուծումը պարզ է. պարզապես հետևեք, թե հորիզոնը ինչպես է աճում, երբ նյութ է ընկնում ներս: Խնդիրը՝ *ո՞ր* հորիզոնը:

Մարդկանց մեծ մասը պատկերացնում է **իրադարձությունների հորիզոնը**՝ իրական անվերադարձ սահմանը: Բայց այն ունի նուրբ և անհարմար հատկություն. սահմանվում է տիեզերքի ամբողջ ապագայով: Որպեսզի իմանաք՝ իրադարձությունների հորիզոնը *հիմա* որտեղ է, պետք է իմանաք այն ամենը, ինչ երբևէ, ընդմիշտ, ընկնելու է խոռոչի մեջ: Սա տեխնիկական մանրուք չէ: Իրադարձությունների հորիզոնը կարող է սկսել աճել լիովին դատարկ, հարթ տարածության մեջ *նախքան* այն սնուցող նյութի հասնելը՝ պարզապես որովհետև այդ նյութը հետագայում հաստատ հասնելու է: Նրա մակերեսը կարող է մեծանալ այնտեղ, որտեղ տեղային ոչինչ չի կատարվում:

Ինչպե՞ս կարող է հորիզոնը աճել նյութի հասնելուց առաջ

Այս խնդրի գիտական անունը իրադարձությունների հորիզոնի **տելեոլոգիական բնույթն** է, որը նաև կոչվում է նրա **գլոբալ սահմանում**: Այստեղ «տելեոլոգիական» չի նշանակում, որ հորիզոնը նպատակ ունի, կանխատեսում է ապագան կամ ազդեցություն է ուղարկում ժամանակի մեջ հետ: Դա նշանակում է, որ որևէ իրադարձություն հորիզոնի ներսում է, թե՞ ոչ՝ կարելի է որոշել միայն տարածաժամանակի ամբողջ ապագա պատմությունը իմանալուց հետո:

Ֆորմալ սահմանումը նույնն ավելի կարճ է ասում: Պատկերացրեք **սապագա լուսանման անվերջությունը**՝ «I-plus» և գրված $\mathcal{I}^+$, որպես այն վերջնակետը, որին հասնում է լույսը, որը ընդմիշտ փախչում է այլապես դատարկ, անվերջ հեռավոր սապագա: Իրադարձությունների հորիզոնը սահմանն է այն իրադարձությունների միջև, որոնցից դեպի դուրս ուղարկված լուսային ազդանշանը ի վերջո կարող է հասնել այդ վերջնակետին, և նրանց, որոնցից

ոչ մի նման ազդանշան երբեք չի կարող: Ընդհանուր հարաբերականության ստանդարտ նշումով այն ապագա լուսանման անվերջության պատճառական անցյալի սահմանն է՝ $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$: Քանի որ *երբեք* բառը ներկառուցված է այդ սահմանման մեջ, միայն այստեղ և հիմա արված ոչ մի չափում չի կարող ճշգրիտ գտնել իրադարձությունների հորիզոնը:

Կծկվող գնդաձև պատյանը տարօրինակությունն ակնհայտ է դարձնում: Մինչ պատյանը կհասնի, դրա ներսի շրջանը կարող է դատարկ և տեղային հարթ լինել: Կենտրոնից դեպի դուրս լույսի ճառագայթներ ուղարկելը հաջորդաբար ավելի ուշ ժամանակներում. վաղ ճառագայթները փախչում են, իսկ ուշերը հանդիպում են կծկվող պատյանին այնպիսի երկրաչափության մեջ, որտեղ այլևս դուրս գալ չեն կարող: Իրադարձությունների հորիզոնը այս երկու արդյունքները բաժանող սահմանն է: Ժամանակի մեջ հետ հետևելիս այդ սահմանը սկսվում է կենտրոնից և ընդարձակվում դեռ դատարկ, հարթ ներքին տարածքով՝ նախքան պատյանի հասնելը: Նրա աճող մակերեսը տեղային նյութական հոսք չի հաղորդում. այն գրանցում է, թե ավարտված տարածաժամանակում փախուստի որ ուղիներն են բաց մնում:

Այս պատկերում ոչինչ ժամանակի մեջ հետ չի գործում: Եթե պատյանը շեղվեր և սև խոռոչ չձևավորվեր, ավարտված տարածաժամանակը այլ կլիներ, և այդ ավելի վաղ շրջանը իրադարձությունների հորիզոնի մաս չէր լինի: Դասը այն չէ, որ ապագան փոխում է անցյալը, այլ որ իրադարձությունների հորիզոնը **գլոբալ պատճառական սահման** է, ոչ մակերևույթ, որը մոտակա դիտորդը կարող է մեկ պահին հայտնաբերել: Հենց սա է պատճառը, որ փոփոխվող սև խոռոչին հետևելիս ֆիզիկոսներն օգտագործում են քվադրիպոլ կամ դինամիկ հորիզոններ:

Սա իրադարձությունների հորիզոնը դարձնում է անպիտան սև խոռոչի «վիճակին» ընթացիկ հետևելու համար: Համակարգչային սիմուլյացիայում այն նույնիսկ հնարավոր չէ գտնել մինչև սիմուլյացիայի ավարտը, և ակնհայտորեն հնարավոր չէ դրանով պահ առ պահ ջերմաստիճան կամ էնտրոպիա հետևել:

Քայլը՝ հորիզոն, որը կարելի է տեղային սահմանել

Abhay Ashtekar-ի, Daniel Paraizo-ի և Jonathan Shu-ի նոր հոդվածը իր արդյունքը կառուցում է հորիզոնի այլ հասկացության վրա՝ **քվադրիպոլ** հորիզոն, որը սահմանվում է միայն իր անմիջական շրջակայքի երկրաչափությամբ՝ առանց անվերջ ապագային հղման: Այս «դինամիկ հորիզոնի հատվածները» այն մակերևույթներն են, որոնք թվային հարաբերականության մասնագետներն արդեն օգտագործում են միաձուլման սիմուլյացիաներում սև խոռոչներ գտնելու համար, հենց որովհետև դրանք տեղային և «ազնիվ» են. դրանց մակերեսն աճում է միայն այնտեղ, որտեղ էներգիա իրականում հատում է դրանք:

Դրանից վեր հեղինակները լուծում են խնդրի ավելի դժվար կեսը: Սովորական թերմոդինամիկայում հավասարակշռությունից շատ հեռու համակարգը հայտնիորեն սահում է. նրան մեկ ջերմաստիճան կամ ճնշում մաքուր կերպով վերագրել հնարավոր չէ, որովհետև այդ մեծությունները լավ սահմանվում են միայն երբ համակարգը կայունանում է: Սև խոռոչները նույն խնդիրն ունեն, մինչև, ինչպես ցույց են տալիս հեղինակները, օգտագործում եք ընդհանուր հարաբերականության հատուկ առանձնահատկություն: Հավասարակշռության մեջ սև խոռոչը՝ Kerr սև խոռոչը, ամբողջությամբ որոշվում է ընդամենը երկու թվով՝ չափով և պտույտով: Այդ պատճառով հեղինակները կառուցում են քարտեզ, որը ցանկացած ուժգին զարգացող, հավասարակշռությունից դուրս հորիզոնից յուրաքանչյուր պահին կարողում է այն հավասարակշռային սև խոռոչի երկու թվերը, որին այն տվյալ պահին նման է: Այդ քարտեզով նույնիսկ ուժգին փոփոխվող սև խոռոչին կարելի է վերագրել **Ժամանակից կախված ջերմաստիճան և պտույտ:**

Այս բաղադրիչներով՝ հորիզոնով տեղային սահմանված էներգետիկ հոսք և ակնթարթային ինտենսիվ մեծություններ, նրանք առաջին օրենքը տարածում են հավասարակշռությունից կամայականորեն հեռու սև խոռոչների վրա: Կարևոր է, որ նոր օրենքը նկարագրում է **իրական ֆիզիկական գործընթացներով առաջացած վերջավոր փոփոխություններ**՝ նյութ և գրավիտացիոն ալիքներ, որոնք հատում են հորիզոնը, ոչ երկու սառեցված վիճակների միջև անվերջ փոքր քայլեր: Նրանք դա գուցակցում են համապատասխան երկրորդ օրենքի հետ, որի ձևակերպումն այժմ *քանակական* է. հորիզոնի մակերեսը աճում է ներս հոսած էներգիային ուղղակիորեն կապված չափով: Առաջին և երկրորդ օրենքները միասին մատնանշում են մեկ մաքուր եզրակացություն. նույնիսկ ամենաուժգին հնարավոր իրադարձության մեջ գտնվող սև խոռոչի համար էնտրոպիայի ճիշտ չափը մնում է նրա հորիզոնի մակերեսը:

Ինչ սա չի ապացուցում

- Այն **չի** լուծում քվանտային գրավիտացիան: Սա *դասական* ընդհանուր հարաբերականության արդյունք է՝ օգտագործելով հորիզոնի մակերեսը էնտրոպիայի հետ նույնացնելու ստանդարտ մոտեցումը: Այդ էնտրոպիան ավելի հիմնարար բանից չի բերվում:
- Այն **չի** հաշվում միկրովիճակները և չի բացատրում, թե սև խոռոչի էնտրոպիան *ինչից* է կազմված: Այն ընդլայնում է սև խոռոչային թերմոդինամիկայի հաշվապահությունը, ոչ բացում արկղը և ցույց տալիս միկրոսկոպիկ ազատության աստիճանները:
- Այն **չի** լուծում սև խոռոչի տեղեկատվական պարադոքսը: Այդ խնդիրը քվանտային տեսության մեջ է. այս հոդվածը դրան չի դիպչում:
- Սա **դիտարկում կամ չափում չէ**: Ոչ աստղադիտակ, ոչ տվյալներ, ոչ գրավիտացիոն ալիքների ազդանշան՝ սա մաթեմատիկա է: Միաձուլվող սև խոռոչի «ջերմաստիճանն» այստեղ հավասարումներում ճշգրիտ սահմանված մեծություն է, ոչ բան, որը ջերմաչափով կկարդաք:
- Այն **չի** հերքում Bekenstein-ին և Hawking-ին: Այն *տարածում* է նրանց պատկերը դինամիկ ռեժիմի վրա, որտեղ սկզբնական՝ միայն հավասարակշռային օրենքը ոչինչ չէր ասում:

Ուժեղ են ապացույցները

Ուժեղ՝ այն բանի համար, ինչ սա է. մանրակրկիտ, ներքինորեն հետևողական մաթեմատիկական ֆիզիկայի աշխատանք ոլորտի առաջատար խմբից, հրապարակված ֆիզիկական գրախոսություն *Letters-ում* որպես *Editors' Suggestion* (ուղեկից հոդվածը ներկայացնում է երկար բերումները):

Ազնիվ գգուշացումները վերաբերում են *տեսակին*, ոչ որակին.

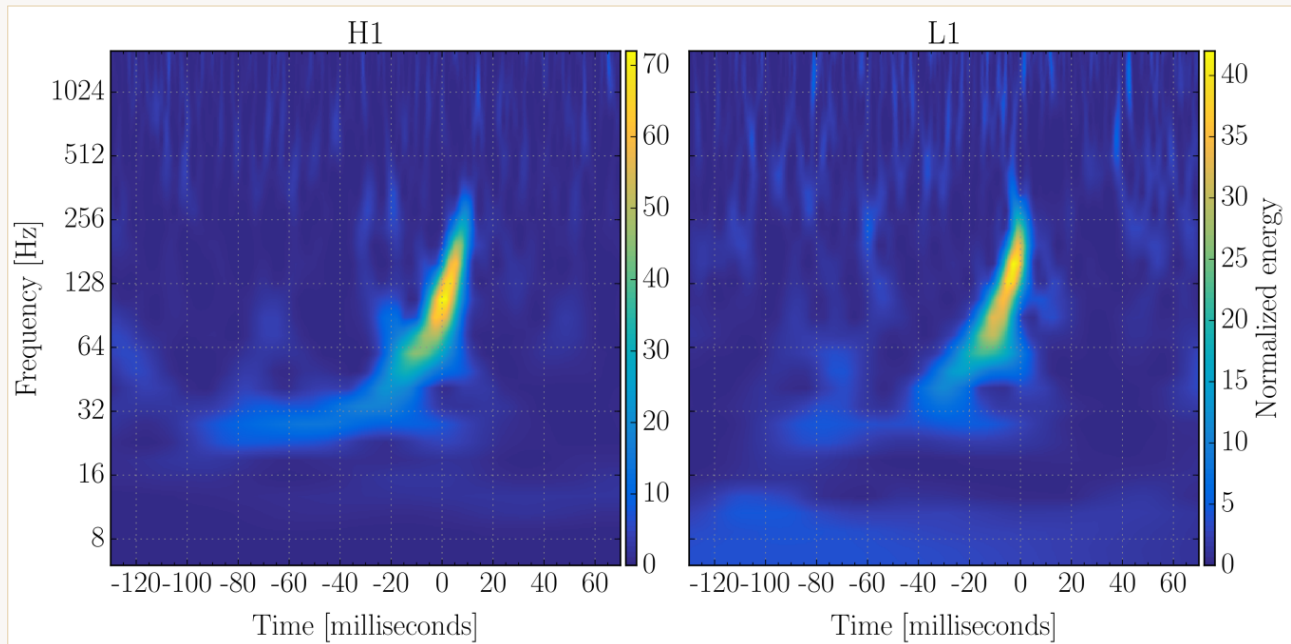
- Արդյունքը հենվում է ընդունված ենթադրության վրա, որ հորիզոնի մակերեսը *Էնտրոպիա* է՝ մակերեսը բաժանած Նյուտոնի հաստատունի և Պլանկի հաստատունի հետ կապված ստանդարտ գործակցով: Եթե ամբողջական քվանտային գրավիտացիոն տեսությունը երբևէ վերանայի այդ նույնացումը, մեկնաբանությունն էլ կփոխվի:
- Գլխավոր հաշվարկները մշակված են ամենատարածված դեպքի համար՝ *spacelike* դինամիկ հորիզոններ, առանցքային համաչափությամբ: Հեղինակները պնդում են, որ սահմանափակումները Էական չեն, բայց լրիվ ընդհանուր ձևակերպումը մասամբ հենվում է այլ աշխատանքի վրա:
- «Էնտրոպիան հավասար է հորիզոնի մակերեսին նույնիսկ հավասարակշռությունից դուրս» համոզիչ *նույնացում* է, որը բնական է դառնում նոր առաջին և երկրորդ օրենքներով, ոչ միկրոսկոպիկ վիճակագրությունից ստացված թեորեմ:

Այսինքն՝ հիսուն տարվա շրջանակի խիստ ընդլայնում, ոչ փորձարարական հայտնագործություն և ոչ բնության նոր օրենք, որը սպասում է փորձարկման:

Ինչու է սա կարևոր

Երկու պատճառ՝ մեկը գործնական, մյուսը գաղափարական:

Գործնականորեն, այն սև խոռոչները, որոնք հիմա իրականում ուսումնասիրում ենք՝ նրանք, որոնց LIGO-ն և Virgo-ն լսում են միաձուլվելիս, իրենց ամենակարևոր պահերն անցկացնում են հավասարակշռությունից շատ հեռու: Այս հոդվածի մեծությունները կառուցված են նույն տեղային սահմանված հորիզոններից, որոնց սիմուլյացիաներն արդեն հետևում են, ուստի տալիս են սկզբունքային եղանակ խոսելու սև խոռոչի Էնտրոպիայի և ջերմաստիճանի մասին *միաձուլման կամ կոլապսի ընթացքում*, ոչ միայն առաջ և հետո:



GW150914-ը՝ ուղղակիորեն հայտնաբերված առաջին գրավիտացիոն ալիքային ազդանշանը, եկել է երկու սև խոռոչների միաձուլումից: Այս ժամանակահատվածում քարտեզները ցույց են տալիս ազդանշանը LIGO Hanford-ում (ձախ) և LIGO Livingston-ում (աջ). երկու դետեկտորներում էլ պայծառ հետագիծը վեր է բարձրանում, երբ ազդանշանի հաճախականությունն աճում է դեպի միաձուլումը: Սա հավասարակշռությունից հեռու սև խոռոչային համակարգի իրական օրինակ է՝ նոր թերմոդինամիկական շրջանակի համատեքստ, ոչ դրա համար դիտարկային ապացույց:

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

Գաղափարապես սև խոռոչների թերմոդինամիկական վարքը քվանտային գրավիտացիայի մասին մեր ունեցած քիչ կոնկրետ հուշումներից է՝ այն տեղն է, որտեղ գրավիտացիան, քվանտային տեսությունը և թերմոդինամիկական տեսանկյունից հանդիպում են: Ճշգրտել, թե ուժգին փոփոխվող սև խոռոչի համար «Էնտրոպիա» և «ջերմաստիճան» բառերը ինչ են նշանակում, սրում է այն թիրախը, որին ցանկացած ապագա քվանտային տեսություն պետք է հարվածի: Դա չի պատասխանում խոր հարցին, թե սև խոռոչի Էնտրոպիան իրականում ինչ է: Այն հարցը ավելի ճշգրիտ է ձևակերպում, ինչը ֆիզիկայի այս անկյունում աշխատանքի մեծ մասն է:

Կարճ ամփոփում

Սև խոռոչները ենթարկվում են թերմոդինամիկային նման օրենքների, բայց 1973-ի մաքուր «առաջին օրենքը» համեմատում էր միայն հավասարակշռության մեջ հանգիստ սև խոռոչներ և չէր կարող իրական գործընթաց նկարագրել: Ashtekar-ը, Paraizo-ն և Shu-ն առաջին և երկրորդ օրենքները տարածում են հավասարակշռությունից կամայականորեն հեռու՝ միաձուլվող, նյութ կլանող, ringing down անող սև խոռոչների վրա՝ օգտագործելով տեղային սահմանված «դինամիկ հորիզոններ» և քարտեզ, որը փոփոխվող սև խոռոչին վերագրում է ակնթարթային ջերմաստիճան և պտույտ:

Արդյունքն այն է, որ հորիզոնի մակերեսը նույնիսկ ուժգին իրադարձությունների ընթացքում մնում է էնտրոպիայի ճիշտ չափը: Սա դասական ընդհանուր հարաբերականության խիստ արդյունք է, ոչ քվանտային գրավիտացիա, ոչ դիտարկում, ոչ միկրովիճակների հաշվարկ և ոչ տեղեկատվական պարադոքսի լուծում:

Առանց չափազանցության

Ինչ է ցույց տալիս հոդվածը. Սև խոռոչների մեխանիկայի առաջին և երկրորդ օրենքների մաթեմատիկորեն հետևողական ընդլայնում լիովին դինամիկ, հավասարակշռություն հեռու սև խոռոչների վրա՝ կառուցված քվադրոկալ դինամիկ հորիզոնների վրա: Այն սահմանում է վերջավոր, գործընթացի վրա հիմնված առաջին օրենք և քանակական երկրորդ օրենք և բնական է դարձնում դինամիկ սև խոռոչի էնտրոպիան հորիզոնի մակերեսի հետ նույնացնելը:

Ինչն է իրական, բայց մեկնաբանական. Հավասարակշռությունից դուրս «էնտրոպիա = հորիզոնի մակերես» նույնացումը: Նոր օրենքները այն համոզիչ են դարձնում, բայց այն ժառանգում է ստանդարտ դասական մակերես-էնտրոպիա ենթադրությունը, ոչ բերում է այն:

Ինչ չի ցույց տալիս. Քվանտային գրավիտացիայի տեսություն, սև խոռոչի էնտրոպիայի միկրոսկոպիկ ծագում կամ «հաշվարկ», տեղեկատվական պարադոքսի լուծում, որն է դիտարկային կամ փորձարարական արդյունք կամ ֆիզիկապես չափելի ջերմաստիճան:

Հիմնական սահմանափակումները. Ամբողջությամբ դասական ընդհանուր հարաբերականություն, գլխավոր արդյունքները ապացուցված են տարածված spacelike, առանցքային համաչափ դեպքի համար՝ ընդհանուրությունը ուղեկից աշխատանքով հիմնավորելով, և մակերես-էնտրոպիա նույնացումը ենթադրվում է, ոչ վիճակագրական մեխանիկայից ապացուցվում:

Որքան վստահություն պետք է ունենա սովորական ընթերցողը. Բարձր վստահություն, որ սա ամուր, հեղինակավոր տեսական առաջընթաց է, որը իսկապես սև խոռոչների թերմոդինամիկական տարածում է դինամիկ ռեժիմի վրա: Նույնքան բարձր վստահություն, որ սա *նոր դիտարկումների* մասին պնդում չէ, քվանտային գրավիտացիա չէ և հայտնի տեղեկատվական խնդրի լուծում չէ: Ճիշտ վերաբերմունքը՝ իրական քայլ հասկանալու մեջ՝ արված կավիճով, ոչ աստղադիտակով:

Աղբյուրներ

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)
<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>